

通风措施对于改善高桩码头上部结构耐久性的 模拟分析

郑永来, 余坤龙, 潘坦博, 章 钦

(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 考虑到近海地区形成的盐雾易于在高桩梁板式码头的梁格空间内聚集, 码头上部结构面临严重的大气区锈蚀风险, 为从源头上降低锈蚀风险, 基于优化结构物通风的思想, 运用数值模拟方法构建了多组自然通风和单独设置风道的辅助通风模型模拟实际高桩码头梁格空间流场变化。结果表明, 在自然通风组中当遮挡比为 1.15 时, 梁格空间内自然通风形成的流场扰动最弱; 针对处于这种不利情况下的码头结构, 提出 3 种辅助通风措施(梁上开孔法、板上开孔法、联合开孔法), 对其效果进行了对比。3 种措施的开孔半径对梁格内部的空气流通特性变化趋势影响不大; 孔径变小会大大降低梁格进风口区域空气的风速; 结合施工难度和成本综合分析得知, 板上开孔方案最优。

关键词: 高桩码头; 盐雾; 梁格空间; 通风

中图分类号: U656.1+13

文献标志码: A

as the height ratio of the edge stringer to the air inlet) in the natural ventilation group is 1.15, the airflow inside the gridiron reaches the weakest turbulence. Under this condition, three auxiliary ventilation measures are proposed to enhance the durability of the pile-supported wharf. The numerical simulation results show that the opening radius of the three measures have little effect on the variation of the air circulation characteristics in the gridiron space. A smaller aperture will greatly reduce the wind speed in the gridiron inlet area. Considering construction difficulty and engineering cost, the plan for opening holes on the board is the best.

Key words: piled beam-slab wharf; salt fog; gridiron space; ventilation

Simulations of High-Piled Wharf Super Structures Based on Ventilation Optimization

ZHENG Yonglai, YU Kunlong, PAN Tanbo, ZHANG Qin
(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The salt fog originated from offshore zone and was easy to gather in the semi-closed space formed by beams and slabs of pile-supported wharf called gridiron space. It could induce the premature failure of substructure durability of the wharf. Therefore, numerical simulations are conducted to construct the natural ventilation models and the auxiliary ventilation models to simulate the spatial flow field changes in the gridiron space. It is concluded that when the shield ratio (defined

高桩码头作为主要的港口码头结构形式之一, 具有砂石用量省、削浪效果好、结构简单等优点, 适用于各种可以沉桩的地基, 尤其是软土地基^[1], 因此广泛应用于我国沿海及沿江港口。

但是沿海地区较为恶劣的环境使得高桩码头的耐久性面临严峻的挑战。大量工程经验表明: 高桩码头结构的耐久性受碳化、波浪力、硫酸盐浸入等环境因素的影响, 海洋环境中氯离子腐蚀是导致结构劣化的主要原因^[2-4]。特别地, 近海盐雾易于累积在码头横梁、纵梁所形成的半密闭梁格空间内从而引起码头上部结构的耐久性问题。盐雾与混凝土表面接触时, 在浓度梯度力的驱动下通过混凝土保护层到达钢筋表面, 破坏其表面钝化膜, 导致钢筋局部锈蚀^[5-6]。在某些运行水位与码头临海侧边纵梁底部

收稿日期: 2019-12-27

基金项目: 上海市科学技术委员会重大项目(17DZ1202904)

第一作者: 郑永来(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为港工、水工和地下结构抗震、耐久性。

E-mail: zyll@tongji.edu.cn

通信作者: 潘坦博(1995—), 男, 博士生, 主要研究方向为码头结构耐久性、结构健康监测。

E-mail: 1830149@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

净空较小的码头结构中,这种由于盐雾积累导致上部结构耐久性遭破坏的风险更是大幅度提高。

目前,关于高桩码头耐久性的研究主要集中于提升建筑材料本身耐久性上,达波等^[7]采用线性极化电阻法(LPR)和交流阻抗谱法(EIS)研究了阻锈剂种类及掺量对珊瑚混凝土(CAC)中钢筋腐蚀性能的影响;卢静、王光华等^[8]采用冷喷涂技术,针对海洋环境中各类钢铁构件采用不同合成材料制备防腐涂层;熊建波、王胜年等^[9]研究了不同硅烷浸渍放在海工混凝土结构中的保护效果,其结果表明膏状BS1701硅烷的保护效果最佳;同济大学的赵明等^[10]将矿粉、硅灰掺入混凝土中形成复合胶凝材料,并在硫酸环境中探究材料的抗酸性能,并给出 $\text{pH}=2$ 时腐蚀速度、深度与时间的关系;复旦大学的何斌等^[11]使用氰凝材料对码头钢筋混凝土结构进行填充防腐堵漏的修复过程,修复后有效地改善了码头外观,提高了结构耐久性,满足设计要求。

当前这些考虑建筑材料层面增强高桩码头上部结构耐久性的方法均面临着新材料的施工工艺复杂、施工质量难以得到保证等问题,同时采用新材料大幅增加了施工成本,不利于建港投资控制。另一方面,近海大气中的盐雾主要产生自近海破波带,该区域距码头工程前沿有一定距离,而盐雾浓度随离海距离的增加呈指数下降^[12],因此码头工程前沿线新风的盐雾浓度低于近海环境盐雾源的浓度,而码头梁格空间所形成的局部封闭效应以及码头下水面的蒸腾作用使得盐雾在此空间内不断富集,从而导致梁格空间内盐雾浓度显著高于码头前沿自然风的盐雾浓度^[13]。如果进入梁格空间的新风能够使梁格内的流场分布均匀,消除空气低流动区,那么累积的盐雾可以被迅速抽离码头上部结构,从而在源头上降低上部结构的耐久性风险。目前国内外对此研究较少。河海大学的庄宁等^[13]研究了高桩码头梁格空间通风孔设置对盐雾消散的影响,研究表明,纵梁设置通风孔能有效改善梁格空间的气流分布,孔布置在纵梁两端距离横梁1.2 m时,对盐雾的消散效果最明显。

本文基于数值方法,对不同工作水位条件下码头边纵梁对梁格空间的遮蔽效应进行研究,并以设置通风孔道的措施对遮蔽效应较强的梁格空间进行通风优化,通过对几种不同通风孔布置方式下梁格内的空气流场特性进行研究,提出增强码头上部结构耐久性的设计建议。

1 计算模型及研究方案

为了探究具有不同临水面净空的高桩码头在自然通风条件下梁格空间内部的流场分布特征以及不同辅助通风措施对其内部通风效果的影响。选取中国东南沿海典型的高桩码头结构形式为研究对象。

我国东南沿海某集装箱码头地处亚热带季风气候,基础是预应力高强度混凝土(PHC)管桩和现浇横梁,上部结构由5根纵梁和预制-现浇叠合板构成。码头纵、横梁及板截面尺寸如图1所示。

试验分为自然通风组与辅助通风组,共18个模

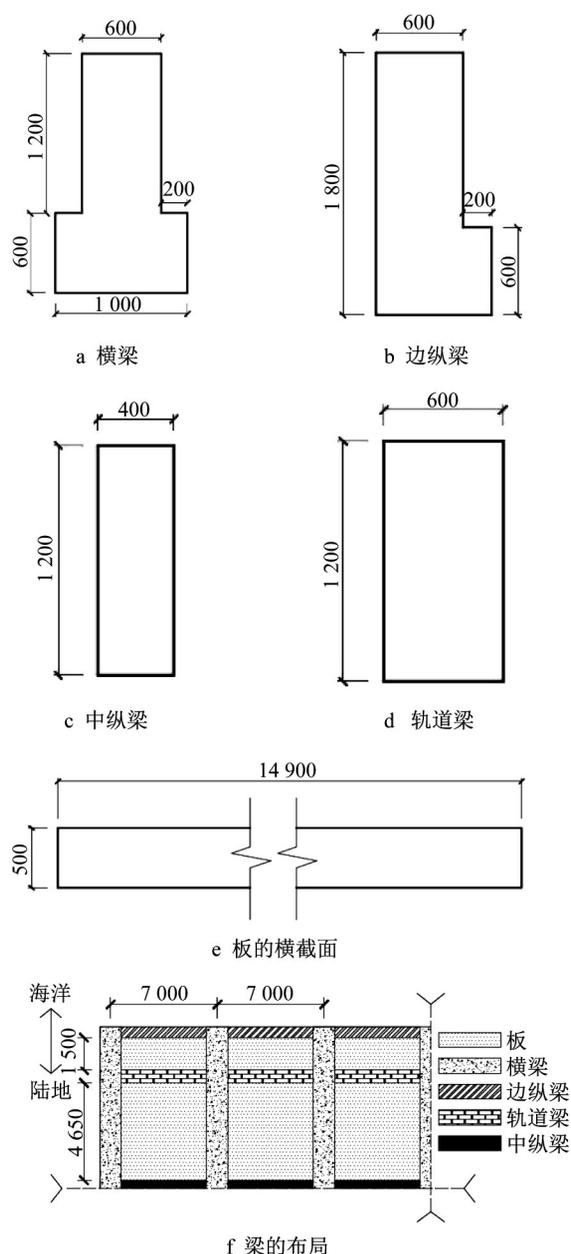


图1 梁与板的横截面(单位:mm)

Fig.1 Lateral section of beams and slabs (unit:mm)

型。每组模型的流入风速相同,为 $5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,风向设计为垂直纵梁向陆域方向。

自然通风组研究了自然通风条件下 9 种遮挡比的梁格空间内气场变化。遮挡比的定义如式(1)所示。遮挡比 S 随水位的升高而增大,对梁格空间内气流影响十分显著。自然通风组的各项数据如表 1 所示。

$$S = \frac{h_b}{h_w} \quad (1)$$

式中: h_w 为水位线距离边梁底面的净高度; h_b 为边梁高度,如图 2 所示。

表 1 不同模型的 h_w 、 h_b 与遮挡比

Tab.1 Details of control series

| 计算区域 | h_w/m | h_b/m | 遮挡比 |
|------|----------------|----------------|------|
| A | 1.2 | 1.2 | 1.00 |
| B | 2.4 | 1.2 | 0.50 |
| C | 3.6 | 1.2 | 0.33 |
| D | 4.8 | 1.2 | 0.25 |
| E | 6.0 | 1.2 | 0.20 |
| F | 7.2 | 1.2 | 0.17 |
| G | 8.4 | 1.2 | 0.14 |
| H | 9.6 | 1.2 | 0.13 |
| I | 10.8 | 1.2 | 0.11 |

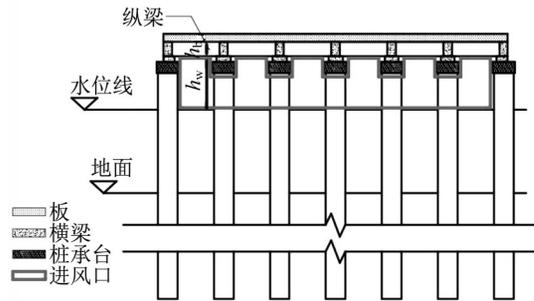


图 2 h_b 和 h_w 的示意

Fig.2 Schematic diagram of h_b and h_w

在自然通风组的基础上辅助通风组研究了不同布置方式和通风孔半径(R)对通风性能的影响。通风孔的布置位置如图 3 所示,具体坐标见表 2。通风孔位置均选于低应力区,最大程度保护了结构的完整性。

试验采用 3 种通风布局方案,以确定通风孔布局对梁格间气流的影响。方案 1:通风孔设置在纵梁,与横梁的水平距离为 c ,与板的垂直距离为 d ;方案 2:通风孔位于梁板,与横梁的距离为 b ,与纵梁的距离为 a ;方案 3:结合了方案 1 与方案 2 的特点,将通风孔布置在纵梁和板上。每种方案的开孔半径以 50mm 的增量从 50mm 到 150mm 递增。

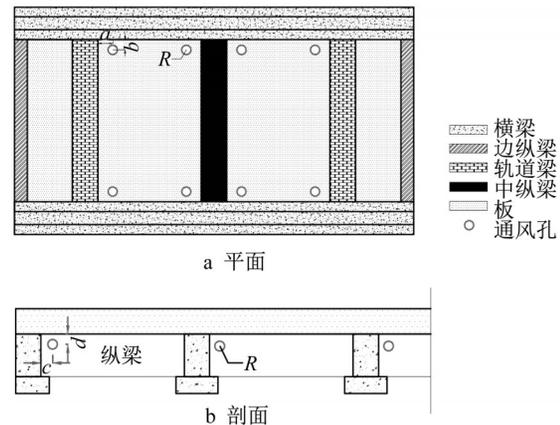


图 3 通风孔布置示意

Fig.3 Schematic layouts of vent holes

表 2 不同通风孔布局及通风孔半径(辅助通风组)

Tab.2 Comparison of different layout sand radiuses of air vents (auxiliary ventilation series)

| 方案 | R/mm | a/mm | b/mm | c/mm | d/mm | 通风孔表面积/ 10^6mm^2 |
|-----|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------------------|
| 1-1 | 150 | | | 1 200 | 300 | 4.239 |
| 1-2 | 100 | | | 1 200 | 300 | 1.884 |
| 1-3 | 50 | | | 1 200 | 300 | 0.565 |
| 2-1 | 150 | 1 500 | 1 150 | | | 3.391 |
| 2-2 | 100 | 1 500 | 1 150 | | | 1.507 |
| 2-3 | 50 | 1 500 | 1 150 | | | 0.377 |
| 3-1 | 150 | 1 500 | 1 150 | 1 200 | 300 | 7.630 |
| 3-2 | 100 | 1 500 | 1 150 | 1 200 | 300 | 3.391 |
| 3-3 | 50 | 1 500 | 1 150 | 1 200 | 300 | 0.942 |

试验采样点位于板底面以下 5 cm,水平布置如图 4 所示,采样点所采集的数据记录在矩阵当中。

$$v_{ij} = \begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} & \cdots & v_{1,12} \\ v_{21} & v_{22} & \cdots & v_{2,12} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ v_{61} & v_{62} & \cdots & v_{6,12} \end{bmatrix}$$

平均风速 \bar{v} 可用于评估每次试验的通风质量,可根据式(2)得出:

$$\bar{v} \approx \frac{\sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^{12} v_{ij}}{72} \quad (2)$$

2 数学模型及数值模拟

基于大型通用有限元模拟软件 ANSYS CFX 模块建立三维物理模型。在建立物理模型时,为了满足计算效率和建模复杂度之间的平衡,将模型简化为梁板结构,以此代表码头上层结构。该方法在单侧自然通风的研究中得到了广泛的应用^[14-16]。

2.1 控制方程

ANSYS CFX 求解器基于纳维-斯托克斯(NS)

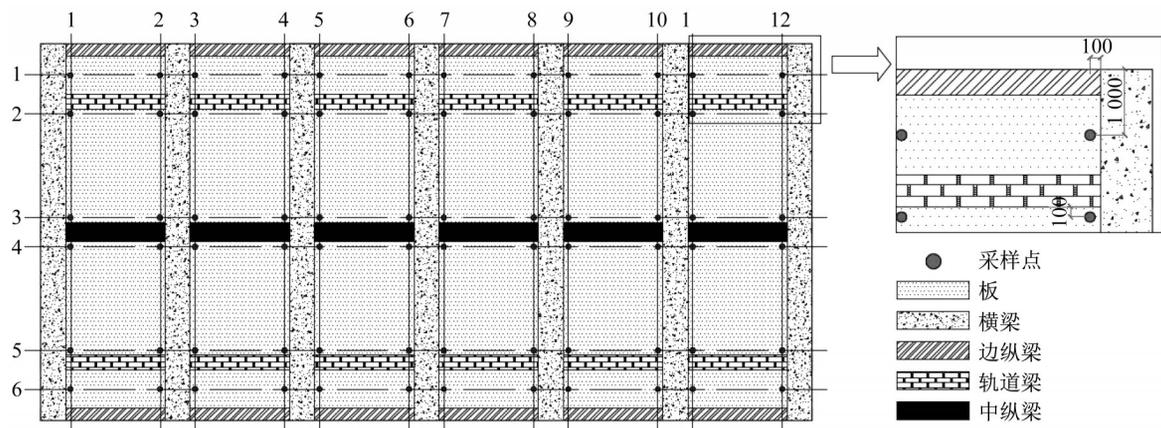


图4 采样点的布置(单位:mm)

Fig.4 Layout of sampling points(unit:mm)

方程并通过补充湍流模型对流体力学问题进行求解。为实现可接受精度尽量节约计算资源的原则,采用 $k-\omega$ 湍流模型作为流体求解补充方程。该湍流模型在国内外研究^[17-20]中已经得到了广泛的应用。

不可压缩流体的连续性方程、动量方程和能量方程如下。

连续性方程:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (3)$$

动量方程:

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right) = -\nabla \rho + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \rho \mathbf{g} \quad (4)$$

能量方程:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla T = \frac{K}{\rho c_p} \nabla^2 T \quad (5)$$

式中: \mathbf{u} 为空气流速; ρ 为流体密度; t 为时间; μ 为动力黏性系数; g 为重力加速度; T 为空气温度; K 为导热系数; c_p 为定压比热容。

考虑空气密度变化引起的浮力效应,采用Boussinesq解,将浮力项进行近似,近似结果如式(6)所示:

$$\rho g = \rho_{\text{ref}} [1 - \beta(T - T_{\text{ref}})] g \quad (6)$$

式中: ρ_{ref} 为空气的参考密度; β 是空气的热膨胀系数; T_{ref} 为工作温度。

BaselineModel(BSL)是基于 $k-\omega$ 双方程湍流模型的一个改进模型^[21],它保证了标准 $k-\omega$ 模型在近壁面的求解精度和计算稳定性。与标准 $k-\omega$ 模型相比,在 ω 方程中引入了附加的交叉扩散项,并对模型常数进行了修正,具体形式如下:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} k) = \nabla \cdot (\Gamma_k \nabla k) + G_k - Y_k \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \omega) = \nabla \cdot (\Gamma_\omega \nabla \omega) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega \quad (8)$$

式中: k 为湍流动能; ω 为比耗散率; Γ_k 和 Γ_ω 表示湍流有效扩散项; G_k 和 G_ω 表示湍流生成项; Y_k 和 Y_ω 表示湍流耗散项; D_ω 表示湍流交叉扩散项。

2.2 求解方法及边界条件

求解控制方程的离散化采用了二阶展开式,压力速度耦合采用SIMPLE算法进行求解,时间的离散采用隐式一阶格式,时间步长按收敛条件判断数(CFL)为1设定。计算边界条件为给定进口流速,入口边界为空气入口,风速选取东南沿海地区3级常风 $5\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[22],边界条件选用inlet,1个标准大气压,湍流强度设为5%;出口边界为压力出口,边界条件选用outlet^[23]。所有固体表面均采用无滑移边界,码头在建模时设置为绝热,边界条件如表3所示。

表3 边界条件

Tab.3 Boundary conditions

| 位置 | 面板下表面 | 纵梁 | 横梁 | 通风孔 | 码头端部 | 海面 | 面板上表面 |
|----|--------|--------|--------|--------|------------|------------|------------|
| 类型 | 无滑移、绝热 | 无滑移、绝热 | 无滑移、绝热 | 无滑移、绝热 | 无滑移、16~20℃ | 无滑移、16~20℃ | 无滑移、16~20℃ |

2.3 网格敏感性分析

为评估计算流体力学(CFD)计算数值中网格划分尺寸对计算结果的不确定性^[24],引入GCI (grid

convergence index)指数对上述影响进行定量评价,该方法被广泛应用于离散化误差^[25]的评估。研究采用5种网格划分方式,分别为n1、n2、n3、n4和n5,其

平均单元长度分别为 10 cm、30 cm、50 cm、70 cm 和 100 cm。以无辅助通风系统的自然通风为例,如表 4 所示,随着单元长度的减小,所选变量的 GCI 减小,表明数值离散化误差减小。中细网格的离散误差在 5.7% 以内,误差控制良好。

在通风孔附近,分别采用 2 个平均单元长度为 20 cm 和 10 cm 的网格进行模拟。模拟结果表明,在进风口与出风口处,会产生微小的速度差;在其他位置,2 种网格划分方法得到的速度和温度分布几乎一致,说明网格的进一步细化并不会对数值结果产生显著的变化。出于对计算量的考虑,无需继续增加网格密度,采用平均单元长度为 20 cm 的网格。

表 4 离散误差的计算

Tab.4 Calculations of discretization error

| 单元平均长度/ 度/cm | GCI/% | 单元平均长度/ cm | GCI/% |
|-----------------|-------|---------------|-------|
| 10(细) | 3.2 | 70 | 23.5 |
| 30 | 5.7 | 100(粗) | 44.5 |
| 50(中等) | 11.2 | | |

2.4 计算域选取

高桩码头梁格剖面图见图 5,网格重构中最大网格尺寸取 0.2m,网格重构迭代间隔取 2,即每迭代 2 步就进行网格重绘的检查;迎风面边纵梁通风孔为压力进口,另一边纵梁设置为压力出口;由于通过梁格的气流应为自由出流,模拟室外环境条件的外部空间要求足够大且为静止状态,板沿纵梁方向前后为 28m,沿横梁方向左右为 20m,板底部距离计算域边界为 20m,距离顶部边界为 20m(图 6)。

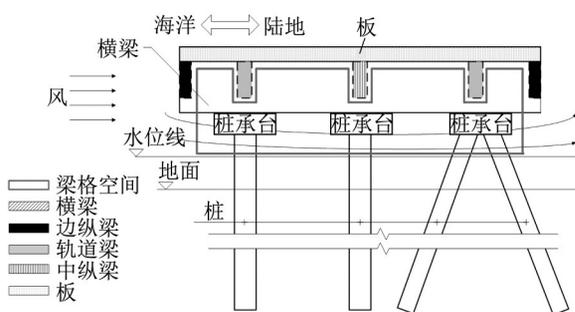


图 5 梁格空间剖面

Fig.5 Sectional drawing of gridiron space

3 计算结果及分析

3.1 遮挡比对梁格内部空气流动的影响

通过分析自然通风组的情况,计算梁格空间处的风量、大气压强等,由此推算盐雾集聚情况。表 5

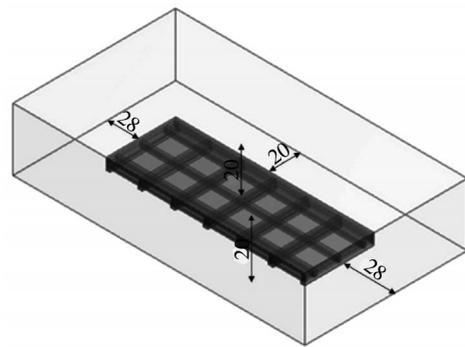


图 6 计算域尺寸示意(单位:m)

Fig.6 Dimension of air calculation domain(unit:m)

表 5 不同遮挡比比较

Tab.5 Comparison of different shield ratios

| 计算域 | h_w/m | h_b/m | S | $\bar{v}/(m\cdot s^{-1})$ |
|-----|---------|---------|------|---------------------------|
| A | 1.2 | 1.2 | 1.00 | 0.2 |
| B | 2.4 | 1.2 | 0.50 | 0.7 |
| C | 3.6 | 1.2 | 0.33 | 1.6 |
| D | 4.8 | 1.2 | 0.25 | 2.5 |
| E | 6.0 | 1.2 | 0.20 | 2.6 |
| F | 7.2 | 1.2 | 0.17 | 2.7 |
| G | 8.4 | 1.2 | 0.14 | 2.8 |
| H | 9.6 | 1.2 | 0.13 | 3.8 |
| I | 10.8 | 1.2 | 0.11 | 4.5 |

给出了自然通风条件下,进风口风速为 $5 m\cdot s^{-1}$ 时,梁格的不同遮挡比对空间的气流的平均风速 \bar{v} 影响;图 7 绘制了遮挡比(S)与平均风速关系曲线。

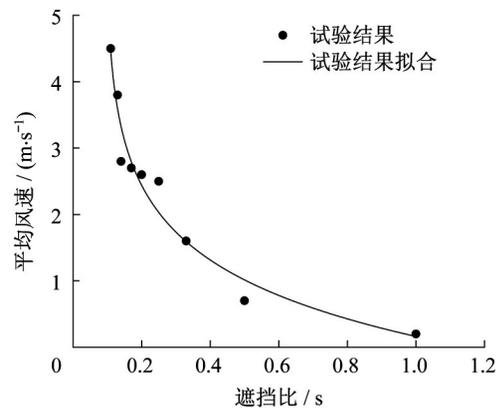


图 7 平均风速随遮挡比的变化

Fig.7 \bar{v} varies with versus shield ratio

分析图 7 和表 5,总体来说,平均风速随遮挡比的增大而减小,这表明在自然通风组中,海平面以上至结构的扩展区域对气流起着关键作用;D、E、F 和 G 计算域之间的风速分布变化波动幅度较小,表明平均风速对在 0.14 ~ 0.25 范围内的遮挡率不敏感;低平均风速出现在高遮挡比范围内(如 A 区和 B 区),这是由于海平面过高时,进风口被压缩成较小的尺寸,导致进风口过低的进风量无法在梁格空间

引起有效扰动。

需要注意的是,当 S 小于0.14时,如计算域H和I,随着 S 的减小, \bar{v} 急剧增加,并最终接近进风口风速($5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)。结果表明,只要 S 足够小,即 h_w 远大于 h_b ,结构对气流的遮挡效应可以忽略不计。在这种情况下,梁格空间内的流场可以被自然风充分扰动,可及时排出积累在梁格空间内的盐雾。

对图7中所示的 \bar{v} 与 S 的关系进行回归分析,其指数拟合式如式(9)所示:

$$\bar{v} = 0.05757 - 1.06137\ln(S - 0.09408) \quad (9)$$

经计算,拟合函数的相关系数平方(COD)的值为0.95109,曲线拟合效果较好。式(9)为码头离水面距离设计提供依据。

结合式(8)、式(9),可以得出当遮挡比 S 达到1.15时, \bar{v} 为 ≈ 0 ,此极端状况下,盐雾完全停滞在梁格内部,对码头结构耐久性造成极大威胁。此时,需采用纵梁开孔的辅助通风法来改善梁格内空气的流动。因此,有必要针对遮挡比等于临界通风遮挡比的情况提出相应的辅助通风措施,并对其效果进行研究。

3.2 通风孔布置对梁格内部空气流动的影响

辅助通风组以遮挡比 $S=1.15$ 的自然通风模型为基准模型,建立9个模型。图8为每种方案在不同采样高度沿横梁方向的计算空气流速(v_h),不同位置的采样高度 H^* 由式(10)进行标准化:

$$H^* = y/h_b \quad (10)$$

式中: H^* 为标准化后的采样高度,即采样点在梁格中的相对位置; y 为板底部与采样点的垂直距离; h_b 为梁格的高度(如图2所示)。

梁格空间在沿垂直方向划分为3个区域(I、II、III区域),对于自然通风模型,梁格空间内空气流速 v_h 随着 H^* 增加而增加。当 H^* 小于0.5时, v_h 不超过 $0.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,表明上部梁格自然通风不良,横梁、纵梁和面板形成的密闭空间气流较弱,容易富集盐雾。当 H^* 大于0.6,空气流速迅速上升至约 $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,表明随着采样点与板底之间的垂直距离的增大,梁格产生的遮挡效应逐渐消失。

分析图8a,当开孔半径为最大的150mm时:区域I中,方案3-1中 v_h 最大达到 $0.93\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,略大于方案2-1中的 v_h 的最大值 $0.84\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,而方案1-1与自然通风组的 v_h 最值分别为 $0.29\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $0.02\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,较前两者相比较小,方案2-1与方案1-1的开孔面积相似,但通风效率高得多,这是由于方案2-1中所有开孔均正对外部气流,而方案1-1中只有进风口正对

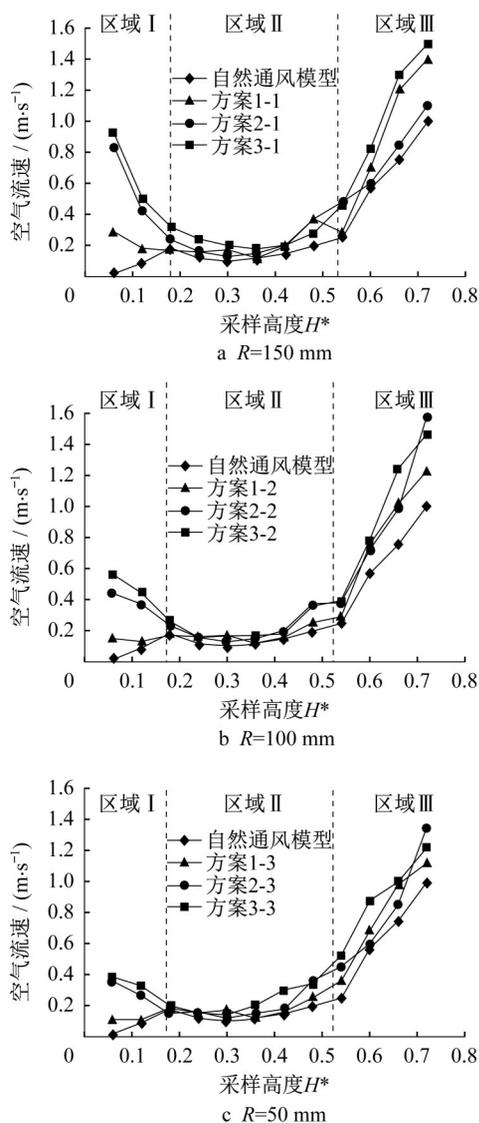


图8 每种方案在不同高度下沿横梁方向的速度分布
Fig.8 Velocity profiles along cross-beam direction at different heights for each scheme

外部气流;在区域I与区域II的临界面中,各方案 v_h 的差异逐渐缩小至小于 $0.14\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,这是因为3种开孔方案所引起的湍流在梁板附近区域;区域II中,各方案空气流速 v_h 差异不大,最大值仅为 $0.18\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,且所有方案的 v_h 均处在较低值,变化不明显,这表明区域II是开孔辅助通风影响最小的区域,梁格在该区域中具有最强遮挡效果;区域III中,所有方案的空气流速 v_h 均呈现巨大的增长趋势,方案3-1风速增至 $1.51\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 略高于方案1-1的 $1.42\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、方案2-1的 $1.11\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以及控制组的 $0.99\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。很显然,自然通风模型的空气流速 v_h 的增长明显慢于具有辅助通风孔的3个方案,这是因为辅助通风模型梁格的遮挡高度被通风孔分割,而自然通风模型保持了完全的遮挡高度。

分析图8b、8c可以得出,当通风孔半径缩减到100 mm和50 mm时,各区域内空气流速的变化情况与开孔半径为150 mm的辅助通风组相似。在区域I内,通风孔半径为100 mm时,方案1-2、2-2、3-2的 v_h 的最大值较开孔半径150mm分别下降48.3%、47.6%、39.8%;通风孔半径为50 mm时,方案1-3、2-3、3-3的 v_h 的最大值分别下降至150mm时的62%、57%、58%。这是因为通风面积的减小,相应的气流湍流度减小,导致空气流速的下降。在区域II内,各个方案的空气流速 v_h 效果相差不大,因为辅助通风措施的效果被半密闭梁格所抑制。在区域III内,各方案的空气流速之间没有明显的差异,说明通风孔的半径和布置方式对下部位置的空气流速的影响非常有限。比较分析区域I中空气流速分布,所有辅助通风开孔方案中,在板上开孔(方案2)与板和纵梁联合开孔(方案3)的效果接近,其流速远大于在纵梁上开孔(方案1)。这表明纵梁上的通风孔对于辅助通风效果贡献最小,若采取该方案,盐雾可能于梁格中聚集。

图9给出了采样点纵向在板下5cm的平面上沿横梁方向距进风口不同距离处的风速图。其中 b_i 代表从近海边起水平方向的第*i*根纵梁,纵梁与纵梁之间形成的区域为计算域,用 $b_i - b_{i+1}$ 表示,代表第*i*根桩与第*i*+1根纵梁形成的子梁格。

对于自然通风模型,空气流速 v_h 在 $0.07 \sim 0.31 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的范围内变化,且与进风口距离 d 关系不大。分析图9a,在 $b_1 - b_2$ 子梁格中,当辅助通风孔孔径为150mm时,所有方案的 v_h 均大于自然通风模型的值,方案1-1、2-1、3-1中出现的 v_h 最大值分别比自然通风模型大333%、267%和633%,并且方案3-1的 v_h 近似等于方案1-1与2-1值的和。可以采用线性叠加方法,估计第1子梁格($b_1 - b_2$)中通风孔布局改变所带来的通风性能改善,即当且仅当第一子梁格的情况下,采用综合开孔的辅助通风量改善约为纵梁开孔与板开孔所产生的通风量改善的总和;在第2子梁格($b_2 - b_3$)中,所有方案的 v_h 在入口处均急剧下降,然后缓慢上升,与子梁格中间达到局部最大,与自然通风模型走向一致;在第3子梁格($b_3 - b_4$)中,方案1-1的 v_h 值与自然通风模型的值十分接近,这表明当通风孔布置在纵梁上时,远离进风口的位置不会有明显的通风改善。而在板上开孔的方案(方案2与方案3)依然有效, v_h 的变化与第2子梁格走向相仿。方案1-1、方案2-1和方案3-1的局部最大 v_h 值分别为 $0.37 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $0.86 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $0.93 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;在

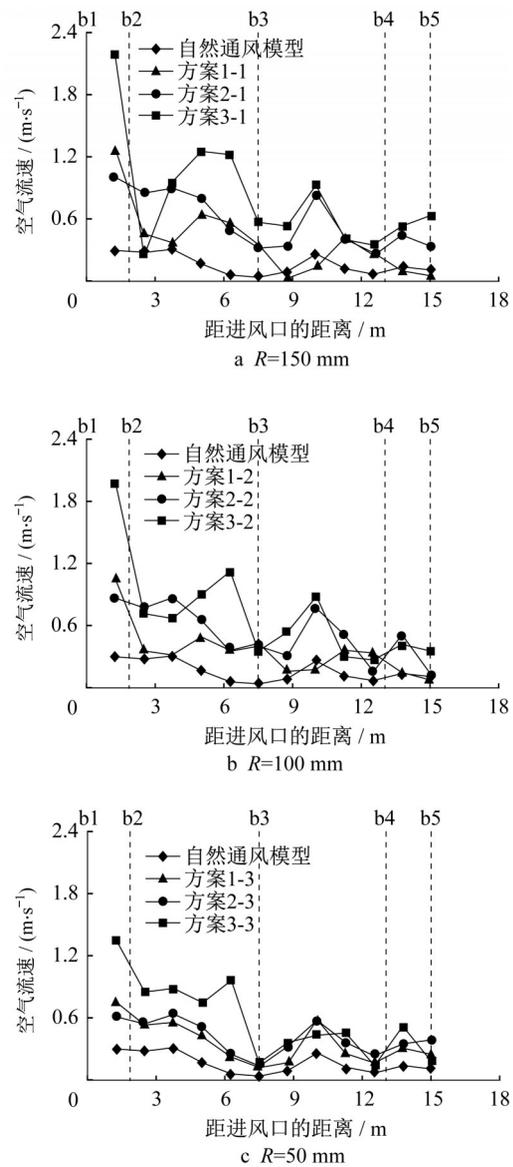


图9 距进风口不同间隔的速度分布

Fig.9 Velocity profiles versus different distance from air inlet

最后一个子梁格($b_4 - b_5$)中,方案1-1与自然通风模型之间的 v_h 差异可以忽略不计,而方案2-1和3-1中的 v_h 最大值也分别达到 $0.46 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $0.68 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

分析图9b、9c,当通风孔半径为100 mm与50 mm时,空气流速 v_h 的分布矢量图与半径为150 mm时风速相似。显然,布置纵梁通风孔仅对前2个梁格有明显的通风改善,而且板上开孔能改善全部子梁格内空间气流分布,有效缓解由于梁格空间盐雾集聚造成结构腐蚀的现状。

图10为9种方案在垂直面上梁格空间详细空气流速矢量图,直观展现了梁格内的气流运动。

分析图10,如前所述,方案3-1、3-2和3-3提供了

最佳的通风量,通风效果优于方案1、略优于方案2,流速矢量图表现出良好的流体运动。这表明不同通风方式下即使通气孔大小相同,其通风量也会有较大差异。

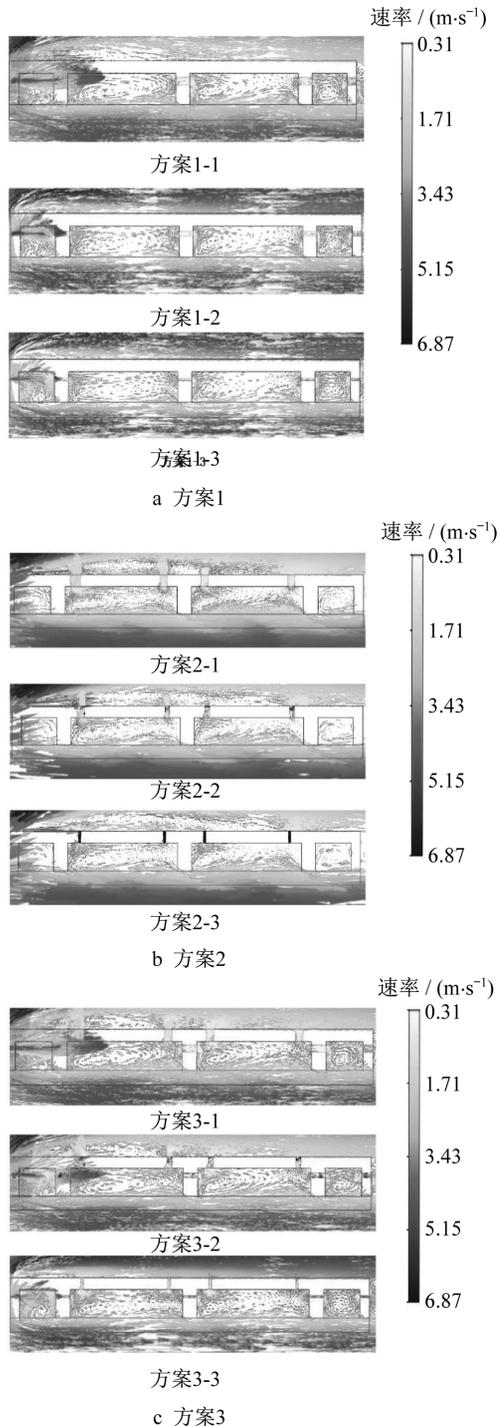


图10 9种方案的速度矢量

Fig.10 Vector of air flow of 9 schemes

综上所述,纵梁横向开孔通风效率不高,板式通风孔和综合通风孔的通风方式均能提供合理的通风,但前者通风孔面积仅为后者的1/2左右,结合成

本与施工难度,在工程实践中宜选择板式通风孔。

4 结论

基于数值方法研究了在自然通风和辅助通风条件下高桩码头梁格空间内的空气流通特性,得出了以下结论:

(1) 通过非线性拟合,得到平均风速与遮挡比之间的关系式;在自然通风组中,存在一个遮挡比临界值1.15(定义为边纵梁高度与迎风面的高度比)使得自然通风驱动下的梁格空间内的流场扰动最弱,此时盐雾易于在梁格空间内积聚。在此临界值以下的高桩梁板式码头结构应考虑设置辅助通风措施。

(2) 高桩码头梁格内部的气流分布随通风孔的布置而变化,纵梁开孔仅在近海侧2个子梁格效用明显,板上开孔法以及综合开孔法在各个子梁格中均有作用,明显改善了梁格内空气流通特性。

(3) 开孔半径对梁格内部的空气流通特性变化趋势影响不大,但开孔孔径变小会大幅降低梁格进风口区域空气的流速。通风孔的布置和半径对梁格下部位置的空气流速影响非常有限。

(4) 板上开孔法和综合开孔法均为可接受的辅助通风开孔形式,但前者达到相同辅助通风效果所需的开孔半径更小,对结构强度的影响较小,降低了施工成本,因此在工程实践中更具推广价值。

参考文献:

- [1] 韩理安. 港口水工建筑物(I)[M]. 北京:人民交通出版社, 2000.
HAN Li'an. Hydraulic structures in harbor engineering (I) [M]. Beijing: China Communication Press, 2000.
- [2] 赵高文,李镜培,樊恒辉,等. 干湿循环下氯盐对现浇混凝土硫酸盐腐蚀劣化及扩散影响[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2018, 46(12):1637.
ZHAO Gaowen, LI Jingpei, FAN Henghui, *et al.* Influence of chloride sulfate attack on degradation and sulfate diffusion of cast-in-situ concrete structures subjected to wet-dry cycles [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2018, 46(12): 1637.
- [3] 邵伟,李镜培. 氯离子侵蚀钢筋混凝土管桩的使用寿命预测[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2014, 42(12):1820.
SHAO Wei, LI Jingpei. Service life prediction of reinforced concrete pipe pile due to chloride ion corrosion [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2014, 42(12): 1820.
- [4] 郝晓丽. 氯腐蚀环境混凝土结构耐久性与寿命预测[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2004.

- HAO Xiaoli. Durability and service life prediction of reinforced concrete structure exposed to chloride environment. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2004.
- [5] 高远,陆春华,袁思奇,等. 海工混凝土氯离子分布概率模型分析与应用[J]. 水利水运工程学报, 2016(1): 37.
- GAO Yuan, LU Chunhua, YUAN Siqi, *et al.* Application analysis of probability model for chloride ion erosion distribution in marine concrete structure [J]. Hydro-Science and Engineering, 2016(1): 37.
- [6] 阎西康. 盐腐蚀钢筋混凝土构件力学性能试验研究[D]. 天津:天津大学, 2005.
- YAN Xikang. Experimental research on mechanical performance of reinforced concrete members corroded by salt [D]. Tianjin: Tianjin University, 2005.
- [7] 达波,余红发,麻海燕,等. 阻锈剂种类对珊瑚混凝土中钢筋锈蚀的影响[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2019, 40(10): 1735.
- DA Bo, YU Hongfa, MA Haiyan, *et al.* Influence of inhibitor types to the reinforcement corrosion of coral aggregate concrete [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2019, 40(10): 1735.
- [8] 卢静,王光华,黄乐之,等. 冷喷涂制备防腐涂层研究现状[J]. 表面技术, 2016, 45(9): 88.
- LU Jing, WANG Guanghua, HUANG Lezhi, *et al.* State of the research of cold spraying anticorrosion coatings [J]. Surface Technology, 2016, 45(9): 88.
- [9] 熊建波,王胜年,吴平. 硅烷浸渍剂对混凝土保护作用的研究[J]. 混凝土, 2004(9): 63.
- XIONG Jianbo, WANG Shengnian, WU Ping. Research and application of silane impregnant in protecting concrete [J]. Concrete, 2004(9): 63.
- [10] 赵明,张雄,张永娟,等. 复合胶凝材料的抗硫酸性能与腐蚀动力学分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2011, 39(8): 1181.
- ZHAO Ming, ZHANG Xiong, ZHANG Yongjuan, *et al.* Resistance of blended cement paste to sulfuric acid attack and corrosion kinetics analysis [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2011, 39(8): 1181.
- [11] 何斌,杨振国. 氰凝材料在煤码头结构修复工程的应用[J]. 水运工程, 2007(11): 142.
- HE Bin, YANG Zhenguo. Application of cyanogen coagulation in coal terminal repair engineering [J]. Port & Waterway Engineering, 2007(11): 142.
- [12] 徐国葆. 我国沿海大气中盐雾含量与分布[J]. 环境技术, 1994(3): 1.
- XU Guobao. Salt fog content and distribution in coastal atmosphere of China [J]. Environmental Technology, 1994(3): 1.
- [13] 庄宁,董洪汉,马晔明,等. 高桩码头梁格空间通风孔设置对盐雾消散的影响[J]. 水运工程, 2018(3): 75.
- ZHUANG Ning, DONG Honghan, MA Yeming, *et al.* Effect of vent setting on salt spray dissipating in grillage space of piled beam-slab wharf [J]. Port and Waterway Engineering, 2018(3): 75.
- [14] GRACA G C, LINDEN P F. Ten questions about natural ventilation of non-domestic buildings [J]. Building and Environment, 2016, 107: 263.
- [15] AI Z T, MAK C M. Determination of single-sided ventilation rates in multistory buildings: Evaluation of methods [J]. Energy and Buildings, 2014, 69: 292.
- [16] BANGALEE M Z I, LIN S Y, MIAU J J. Wind driven natural ventilation through multiple windows of a building: A computational approach [J]. Energy and Buildings, 2012, 45: 317.
- [17] HAUSER G, MINKE G, BANSAL N K. Passiv building design. A handbook of natural, climatic control [J]. Journal of Bioscience & Bioengineering, 1994, 110(5): 582.
- [18] VERSTEEG H K, MALALASEKERA W. An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method [M]. Harlow: Pearson Education, 2007.
- [19] ANSYS Inc. ANSYS fluent user's guide [M]. Canonsburg: ANSYS Inc., 2015.
- [20] ZHAI Z J, ZHANG Z, ZHANG W, *et al.* Evaluation of various turbulence models in predicting airflow and turbulence in enclosed environments by CFD: Part 1—Summary of prevalent turbulence models [J]. Hvac & R Research, 2007, 13(6): 853.
- [21] MENTER F R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications [J]. AIAA Journal, 1994, 32(8): 1598.
- [22] 宋婧. 我国风力资源分布及风电规划研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2013.
- SONG Jing. Study on the wind resource distribution and wind power planning in China [D]. Beijing: North China Electric Power University (Beijing), 2013.
- [23] 许蕾,罗会信. 基于ANSYS ICEM CFD和CFX数值仿真技术[J]. 机械工程师, 2008(12): 65.
- XU Lei, LUO Huixin. The technology of numerical simulation based on ANSYS ICEM CFD and CFX software [J]. Mechanical Engineer, 2008(12): 65.
- [24] ROACHE P J. Quantification of uncertainty in computational fluid dynamics [J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1997, 29(1): 123.
- [25] CELIK I B, GHIA U, ROACHE P J, *et al.* Procedure for estimation and reporting of uncertainty due to discretization in CFD applications [J]. Journal of fluids Engineering-Transactions of the ASME, 2008, 130(7): 078001.